

На рис. 3 приведены эпюры напряжения (нижние кривые) и уровни повреждения (верхние кривые) соответственно через 2,0 мкс после начала соударения пластин с  $u_0 = 0,8$  км/с (кривые 1), 0,6 (2) и 0,4 км/с (3). К этим моментам времени в пластине образуются растягивающие напряжения ( $\delta > 0$ ) и происходит накопление повреждений ( $\omega < 1$ ), которые в первых двух случаях приводят к откольному разрушению.

Численное решение задачи 2 показало, что наличие воздушного промежутка существенно изменяет волновую картину и откол образуется у одной из свободных поверхностей пластин. Это связано с тем, что сжатие и расширение воздушного промежутка происходит за время многократного пробега волны по пластинам. В результате величина возникающих растягивающих напряжений вблизи плоскостей удара оказывается недостаточной для откольного разрушения пластин в этой области. Результаты сравнения эпюр напряжений в точке соударения на моменты времени достижения максимальных растягивающих напряжений при соударении с  $u_0 = 0,7$  км/с в вакууме (кривая 1) и при наличии воздушного промежутка шириной  $l_0 = 6,0$  мм (кривая 2), представлены на рис. 4 ( $t_1 = 2$  мкс,  $t_2 = 12$  мкс).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. F. R. Tuler, B. M. Butcher. Int. J. of Fracture Mech., 1968, 4, 4, 431.
2. М. Уилкинс.— В кн.: Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
3. В. М. Фомин, Э. М. Хакимов. ПМТФ, 1979, 5, 114.
4. С. А. Новиков, А. В. Чернов. ПМТФ, 1977, 2, 143.

УДК 621.7.044

### ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОСТИ СВАРИВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛОЖЕНИЕ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

*И. Д. Захаренко, Б. С. Злобин*

*(Новосибирск)*

Соударение плоских металлических пластин при сварке взрывом можно характеризовать двумя параметрами: углом соударения  $\gamma$  и скоростью точки контакта  $v_k$ . Если в координатах  $\gamma - v_k$  экспериментально определить область сварки какой-либо пары материалов, то окажется, что она ограничена несколькими кривыми. Наибольшее значение с практической точки зрения имеет нижняя граница области сварки взрывом, так как для режимов сварки вблизи нижней границы характерны малые скорости соударения. Сварка в режимах с минимальными скоростями соударения позволяет применять минимальные заряды ВВ. Уменьшение скорости соударения приводит к уменьшению общих пластических деформаций свариваемых образцов и уменьшению количества тепла, выделяющегося в сварном шве.

Исследование процессов, происходящих вблизи нижней границы области сварки, важно также для понимания механизма образования сварного соединения [1, 2].

В работах [3, 4] делается предположение, что при сварке взрывом в точке контакта образуется поток материала, вследствие движения которого происходит самоочищение материалов. Исходя из этих предложений, в работе [1] предложена расчетная формула для определения положения нижней границы в следующем виде:

$$\gamma^* = k \sqrt{\frac{H_V}{\rho v_k^2}}, \quad (1)$$

где  $\gamma^*$  — угол соударения свариваемых пластин;  $v_k$  — скорость точки контакта;  $H_V$  — твердость материала по Виккерсу;  $\rho$  — плотность;  $k$  —

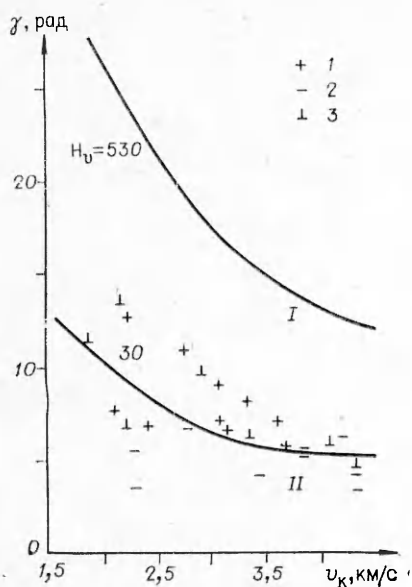


Рис. 1. Результаты экспериментов по сварке меди с высокопрочной сталью при  $H_v = 530$  и 80: 1 — есть сварка; 2 — сварки нет; 3 — частичная сварка.

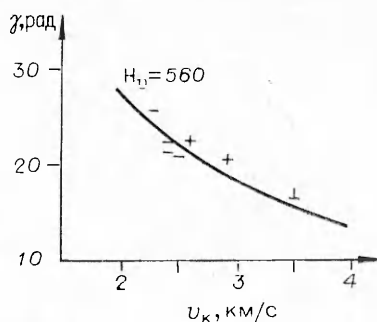


Рис. 2. Результаты экспериментов по сварке высокопрочных сталей. Обозначения те же, что и на рис. 1.

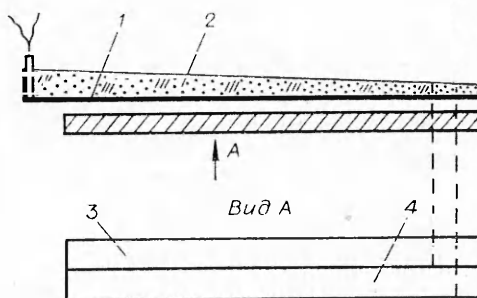


Рис. 3. Схема эксперимента с клиновидным зарядом: 1 — металлая пластина; 2 — заряд ВВ; 3 — твердая пластина; 4 — мягкая пластина.

эмпирический коэффициент. Аналогичные соотношения для определения нижней границы получены в работах [5, 6].

Данное соотношение получено на основании обработки экспериментов по сварке пластин из одного и того же материала. В работе [1] для расчета нижней границы сварки различных материалов по формуле (1) предлагается использовать значение  $H_v$  наиболее твердого материала, так как поток материала, приводящий к самоочищению поверхностей, должен образовываться из материалов обеих пластин. Однако при расчетах по этой формуле режимов сварки материалов, имеющих достаточно большую разницу в твердости, получались результаты, не всегда совпадающие с экспериментом.

Для выяснения вопроса о влиянии твердости свариваемых материалов на положение нижней границы в данной работе проводились эксперименты по сварке материалов с существенно различающейся твердостью.

В первой серии экспериментов на образцы из высокопрочной стали размером  $10 \times 80 \times 200$  мм, имеющие твердость  $H_v = 530 \div 570$ , металлы медные пластины толщиной от 1 до 4 мм с твердостью 80  $H_v$ . Сварка проводилась по параллельной схеме с использованием порошкообразных ВВ. Во всех экспериментах с помощью частотомеров измерялась скорость детонации зарядов ВВ. Угол соударения рассчитывался по методике, описанной в работе [7].

Перед сваркой поверхность стальных образцов травилась химическим способом, а затем зачищалась вулканитовым кругом. Высота микронеровностей при этом способе обработки 50—100 мкм. Для определения качества соединения проводились испытания сварного шва на срез по методике, описанной в [8]. Образец считался сваренным, если прочность соединения оказывалась не ниже прочности наиболее слабого материала.

Результаты экспериментов представлены на рис. 1. Здесь же проведены кривые, рассчитанные по формуле (1) для твердости  $H_v = 530$  и 80. Во всех расчетах значение эмпирического коэффициента  $k = 1,14$ .

Номер опыта	Твердая пластина			Мягкая пластина		
	$H_v$ , кг/мм <sup>2</sup>	$r$	$\gamma^*$ , рад	$H_v$ , кг/мм <sup>2</sup>	$r$	$\gamma^*$ , рад
1	600	0,45	0,13	200	0,39	0,12
2	560	0,56	0,16	116	0,42	0,13

Во второй серии экспериментов на такие же пластины, как и в первой серии, металась пластины из стали 65Г толщиной 2 мм и  $H_v \sim 530 \div 550$ . Остальные условия эксперимента аналогичны первой серии. Результаты экспериментов приведены на рис. 2. Здесь же показана кривая, рассчитанная по формуле (1) для  $H_v = 550$ .

Проведены два эксперимента с клиновидными зарядами по схеме, изображенной на рис. 3. Медная пластинка толщиной 2 мм металась зарядом ВВ, толщина которого изменялась от 18 мм в начале заряда до 5 мм в конце. Общая длина заряда  $L = 300$  мм. В качестве плакируемых использовались две металлические пластины 3 и 4 (см. рис. 3), твердости которых отличались в 3—5 раз. Величина заряда выбиралась таким образом, чтобы на начальном участке происходила надежная сварка пластин, а на конечном она отсутствовала. В экспериментах определялась граница сваренной части образцов (штриховая линия на рис. 3), и рассчитывался угол соударения  $\gamma$  на этой линии. При этом считалось, что  $\gamma = f(r)$ , где  $r$  — отношение массы ВВ к массе пластины в расчетной точке. Расчет проводился по методике, приведенной в [7]. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Для выяснения различия в конфигурации течения в зоне сварки твердых материалов при соударении с плакируемыми пластинами разной твердости проведен эксперимент, в котором твердая стальная пластина ( $H_v = 600$ ) металась на основание, составленное из пластин разной твердости (рис. 4). В данном эксперименте  $\gamma = 0,28$  рад,  $v_k = 2,6$  км/с. На плоскости  $\gamma - v_k$  точка, соответствующая данному режиму, находится между кривыми I и II (см. рис. 1), рассчитанными для твердости  $H_v = 80$  и 530.

Проведенные в данной работе эксперименты, результаты которых представлены на рис. 1 и 2, показывают, что при сварке материалов, имеющих разную твердость, положение нижней границы определяется в основном наименее твердым материалом. Критический угол соударения  $\gamma^*$  в исследуемом диапазоне твердостей слабо зависит от твердости более твердого материала. Так, при уменьшении твердости плакируемого материала в 5 раз величина критического угла изменяется всего на 25% (см. таблицу).

Данные эксперименты можно объяснить следующими соображениями. Положение нижней границы определяется процессами самоочистки материалов в результате наличия в точке контакта потока материала. Однако в отличие от предположения, высказанного в [1], можно считать, что для реализации условий, необходимых для получения сварного соединения, достаточно образования потока из материала одной из свариваемых пластин. Течение потока материала более мягкой пластины по поверхности другой вызывает интенсивную деформацию и удаление посторонних примесей с более твердой пластины.

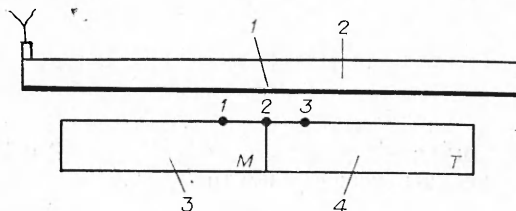


Рис. 4. Сварка высокопрочной пластины с пластинами различной плотности.

1 — металась высокопрочная пластина; 2 — заряд ВВ; 3 — пластина из мягкого материала; 4 — пластина из твердого материала.

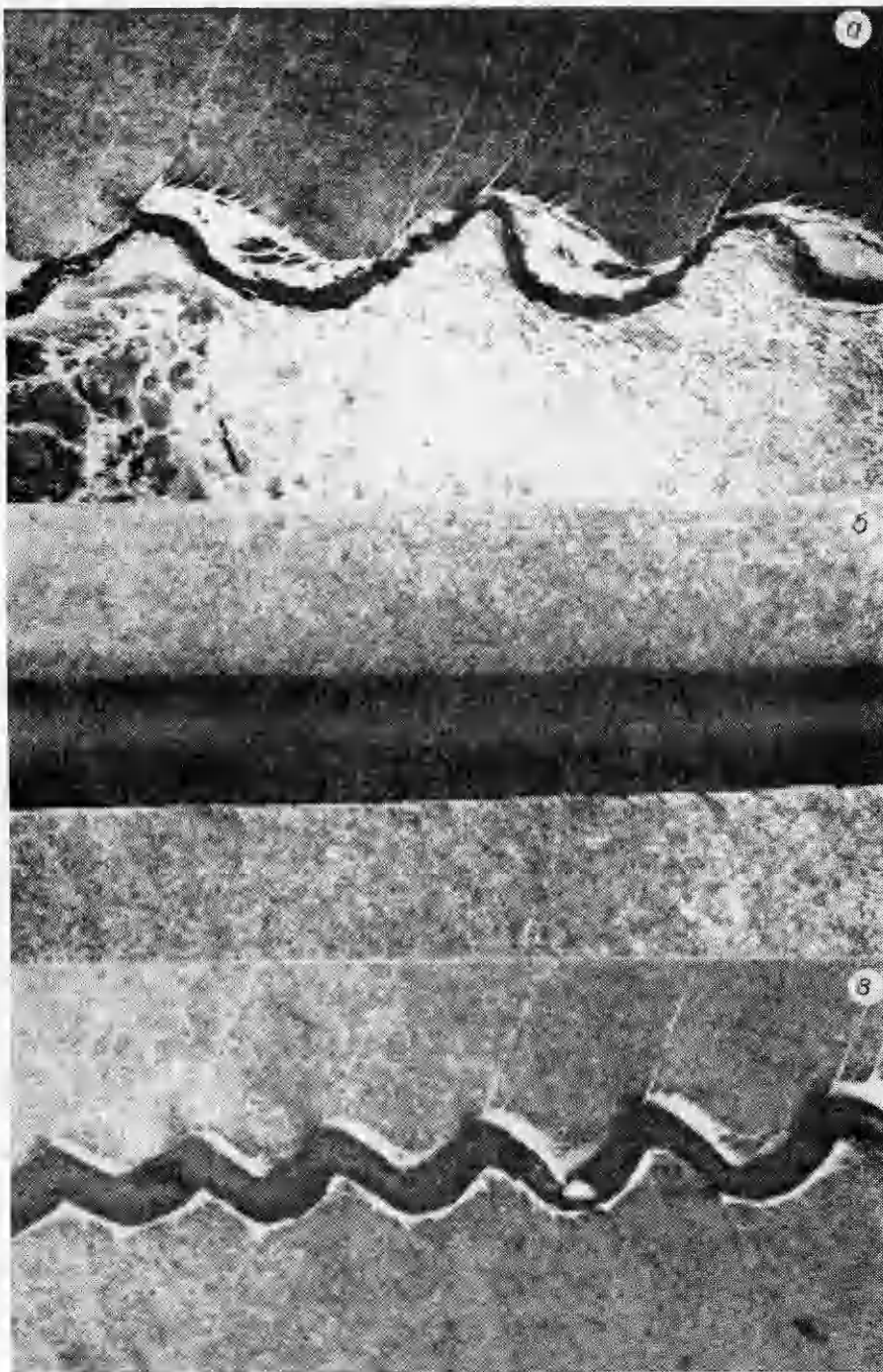


Рис. 5. Фотографии микрошлифов границы раздела пластины (см. рис. 4) в точках 1, а, 2, в, 3, б.

Данное предположение подтверждает эксперимент, схема которого представлена на рис. 4. На фотографии микрошлифа, соответствующего точке 1 (см. рис. 4), в твердой пластине наблюдается четкая волновая картина (рис. 5, а) с наличием в ней полос сдвига, что свидетельствует о большой пластической деформации. При переходе границы твердого материала (точка 2 на рис. 4) происходит быстрое затухание процесса волнообразования (рис. 5, б), на некотором расстоянии от точки 2 граница раздела становится прямой и линии сдвигов отсутствуют (рис. 5, в).

- Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы.
1. Процесс самоочищения при сварке взрывом материалов с различной твердостью может происходить за счет образования потока материала из одной наименее прочной пластины.
  2. При расчете нижней границы области сварки в выражение для расчета критического угла  $\gamma^*$  следует подставлять значение  $H_v$  наименее твердого материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас, И. Д. Захаренко. ФГВ, 1974, 10, 3.
  2. R. H. Wittman.— В кн.: Обработка материалов взрывом. Т. 2. Марьянски Лазни, 1973.
  3. W. Babul. Biul. WAT im J. Dabrowskiego, 1970, 19, 5, 143.
  4. G. Cowan, A. Holzman. J. Appl. Phys., 1963, 34, 4.
  5. В. И. Беляев, Д. Г. Девойно, В. Б. Касперович.— В кн.: Порошковая металлургия. Вып. 5. Минск, 1981.
  6. Р. В. Стефанович.— В кн.: Порошковая металлургия. Вып. 2. Минск, 1978.
  7. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
  8. К. Е. Чарухина, С. А. Голованенко и др. Биметаллические соединения. М.: Металлургия, 1970.
-